

Параметрическая генерация низкочастотных волн электронами плазмы, ускоренными в условиях электронно-циклотронного резонанса

М. Е. Гушин¹⁾, С. В. Коробков, А. В. Костров, Д. А. Одзериho, С. Э. Привер, А. В. Стриковский

Учреждение Российской Академии Наук Институт прикладной физики РАН
603950 Нижний Новгород, Россия

Поступила в редакцию 26 апреля 2010 г.

После переработки 10 июня 2010 г.

Экспериментально показано, что диамагнитный эффект, возникающий при ускорении электронов замагниченной плазмы в ближней зоне антенны в условиях электронно-циклотронного резонанса (ЭЦР), может использоваться для генерации низкочастотных волн. Амплитудная модуляция сигнала, подводимого к антенне, сопровождается модуляцией диамагнитного эффекта и приводит к излучению волн на частоте модуляции в окружающую плазму, при этом протяженная область плазмы, содержащая ускоренные электроны, выступает в роли параметрической “бестелесной” антенны. На основании результатов модельных лабораторных экспериментов предложен способ параметрической генерации низкочастотных волн свистового диапазона в ионосфере Земли мощным амплитудно-модулированным сигналом, подводимым к бортовой антенне космического аппарата.

В экспериментах по активному радиочастотному воздействию на околоземную плазму широко применяются антенные системы, размещаемые на борту космических аппаратов (КА). Как правило, работа мощных (до $P \sim 1$ кВт) бортовых передатчиков сопровождается сильной модификацией плазмы вблизи КА, особенно при приближении рабочей частоты f к “главным” резонансным частотам: электронной плазменной f_{pe} , электронной циклотронной f_{ce} и их гармоникам. В резонансных условиях возможны возбуждение высокодобротных колебаний в плазме и антенных цепях [1], нагрев плазмы и генерация потоков ускоренных заряженных частиц [2–5].

В данной работе предлагается использовать эффекты резонансного ускорения заряженных частиц в ближней зоне бортовых антенн КА для параметрической генерации низкочастотных (НЧ) волн, прямое возбуждение которых с борта КА малоэффективно. Особый интерес представляет генерация волн свистового диапазона $\sqrt{f_{ci}f_{ce}} < F < f_{ce} \ll f_{pe}$, где F – частота НЧ излучения, f_{ci} – ионная циклотронная частота. Эта задача крайне актуальна в связи с постановкой активных экспериментов по зондированию околоземной плазмы волнами очень низких частот (ОНЧ) [6], организации контролируемых высыпаний энергичных частиц радиационных поясов Земли [7], волновому воздействию на области формирования естественных магнитосферных излучений [8]. Ранее авторами был исследован параметрический механизм

возбуждения НЧ свистовых волн высокочастотными (ВЧ) волновыми пучками, основанный на генерации дрейфовых электронных токов под действием усредненной пондеромоторной силы [9]. Предлагаемая в настоящей работе схема возбуждения НЧ волн может оказаться эффективнее, чем описанная в [9], при реализации в активных ионосферных экспериментах.

В качестве основного механизма формирования потоков энергичных электронов рассматривается их ускорение в условиях электронно-циклотронного резонанса (ЭЦР), то есть при приближении частоты бортового передатчика КА к локальным значениям электронной циклотронной частоты и ее гармоник. Этот механизм представляется наиболее перспективным и надежным, так как циклотронное ускорение электронов наблюдается в большинстве активных ионосферных экспериментов, проводимых с использованием мощных антенных систем на борту КА [3, 4]. Поскольку в условиях ЭЦР электроны увеличивают свою поперечную энергию и приобретают дополнительный магнитный момент, в плазме наблюдается диамагнитный эффект: уменьшение индукции внешнего магнитного поля в области, содержащей быстрые частицы. Диамагнитный эффект является удобным макроскопическим индикатором ускорения электронов и может использоваться для создания искусственных возмущений магнитного поля с контролируемыми параметрами. Если ВЧ сигнал, подводимый к антенне, модулирован по амплитуде, то поток ускоренных электронов и, соответственно, наведенный в возмущенной области плазмы магнитный

¹⁾ e-mail: mguschin@appl.sci-nnov.ru

момент изменяются с периодом модуляции. В результате протяженная область пространства, в которую из ближней зоны передатчика поступает модулированный поток ускоренных по поперечной энергии электронов, может выступать в роли “бестелесной” антенны, излучающей волны на частоте модуляции в окружающую плазму.

Параметры активных ионосферных и модельных лабораторных экспериментов при значении масштабного множителя $\gamma = 100$ [10]; в скобках приведены фактические параметры эксперимента на стенде “Крот”

Параметр	Ионосфера	Лабораторная плазма
Концентрация электронов $n_e, \text{см}^{-3}$	$10^3 \div 10^6$	$10^7 \div 10^{10} (10^6 \div 10^{11})$
Температура электронов $T_e, \text{эВ}$	$0.2 \div 5$	$0.2 \div 5 (0.3 \div 3)$
Индукция статического магнитного поля $B, \text{Гс}$	$0.2 \div 0.5$	$20 \div 50 (10 \div 100)$
Размер антенны $L, \text{см}$	1000	10 (7)
Частота $f, \text{МГц}$	$0.1 \div 10$	$10 \div 1000 (65 \div 80)$
Мощность передатчика $P, \text{Вт}$	$100 \div 1000$	$100 \div 1000 (300)$

Модельные лабораторные эксперименты, целью которых является оценка возможности генерации квазистационарных магнитных полей и НЧ волн при ЭЦР нагреве ионосферной плазмы с борта КА, были проведены на крупномасштабном плазменном стенде “Крот”. Квазиоднородный цилиндрический столб замагниченной плазмы длиной около 500 см и диаметром 150 см формировался импульсным высокочастотным индукционным разрядом в аргоне при давлении $p = 3 \cdot 10^{-4}$ торр. Исследования выполнялись в распадающейся плазме после выключения плазмосоздающих генераторов; характерное время распада составляло несколько миллисекунд. Параметры экспериментов, приведенные в таблице, выбирались на основе преобразований подобия [10] с масштабным множителем $\gamma \simeq 100$, равным отношению характерных размеров антенны КА (~ 10 м) и ее уменьшенной лабораторной модели (~ 10 см). Длина свободного пробега электронов l_{ei} относительно кулоновских столкновений превышала размер антенны, то есть был сохранен бесстолкновительный режим взаимодействия

заряженных частиц с ближним полем передатчика, характерный для ионосферных экспериментов.

Мощный ВЧ сигнал ($f = 65 \div 80$ МГц, $P \simeq 300$ Вт) подводился к рамочной антенне диаметром 7 см, установленной на оси плазменного столба ($r = 0$ см), в форме импульса длительностью $\tau = 0.1 \div 100$ мкс. В ВЧ генераторе был предусмотрен режим глубокой (до 100%) амплитудной модуляции сигнала на низкой частоте $f_m = 0.1 \div 10$ МГц. Регистрация возбуждаемых в плазме квазистационарных и НЧ магнитных полей осуществлялась шестивитковыми магнитными зондами диаметром 1.8 см, помещенными в электростатические экраны и изолированными от плазмы тонким слоем диэлектрика. Концентрация и температура электронов измерялись, соответственно, зондом с СВЧ резонатором на четвертьволновом отрезке двухпроводной линии [11, 12] и двойным электрическим зондом.

Как показали эксперименты, в плазме уверенно регистрируется диамагнитный эффект, обусловленный резонансным ускорением электронов в ближней зоне антенны. Возмущения магнитного поля максимальны при приближении частоты сигнала к первой и второй гармоникам электронной гирочастоты, f_{ce} и $2f_{ce}$ (рис.1). Величина диамагнитного эффекта про-

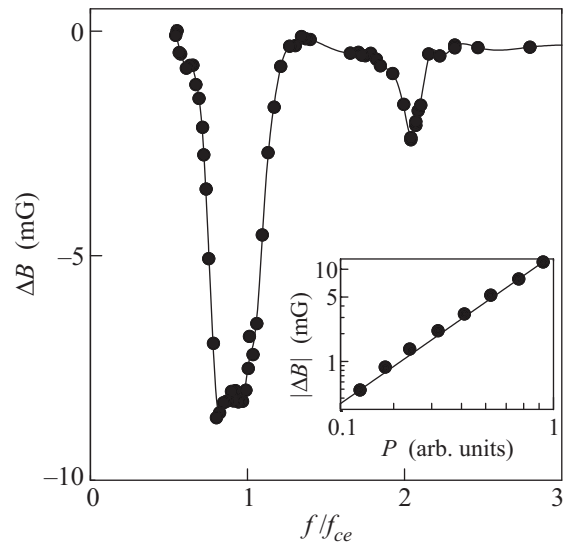


Рис.1. Диамагнитный эффект ΔB , регистрируемый на расстоянии $z = 3.5$ см от рамочной антенны, в зависимости от отношения несущей частоты подводимого к антенне сигнала f к локальному значению электронной циклотронной частоты f_{ce} . На врезке: диамагнитный эффект ΔB в условиях ЭЦР ($f \simeq f_{ce}$) в зависимости от подводимой к антенне ВЧ мощности; точки – экспериментальные данные, прямая – линейная аппроксимация. Концентрация плазмы $n_e \simeq 10^{10} \text{см}^{-3}$, температура электронов $T_e \simeq 1$ эВ

порциональна мощности ВЧ импульса, подводимого к антенне, и достигает $|\Delta B| \sim 10^{-2}$ Гс.

Из рис.1 следует, что основной резонанс (f_{ce}) несимметрично уширен в область низких частот, что, по-видимому, обусловлено возбуждением антенной при $f < f_{ce}$ распространяющихся ВЧ волн свистового диапазона и, соответственно, увеличением эффективных размеров области взаимодействия заряженных частиц с ВЧ полем. Резонанс на второй гармонике ($2f_{ce}$) находится в области непрозрачности плазмы для электромагнитного излучения, $f_{ce} < f < f_{pe}$. Симметричное уширение этого резонанса на уровне $\Delta f/f \geq 10^{-2}$ носит бесстолкновительный характер и обусловлено конечным временем пролета ускоряемых электронов через ближнюю зону антенны с невозмущенной продольной (тепловой) скоростью, $\Delta t \sim L/v_{Te} \simeq 100$ нс. Оцениваемая таким образом ширина линии $\Delta f \sim \Delta t^{-1}$ близка к измеренному значению.

Измерения показывают, что поперечный масштаб диамагнитных возмущений близок к диаметру антенны, поскольку гирорадиус электронов существенно меньше ее размеров, $\rho_e/L \simeq 2 \cdot 10^{-2}$, и структура возмущений воспроизводит распределение поперечной компоненты ближнего электрического ВЧ поля E_{\perp} , дающего основной вклад в циклотронное ускорение электронов. Продольный масштаб диамагнитных возмущений определяется длиной свободного пробега ускоренных частиц, и варьируется в пределах $\Delta z \sim l_{ei} \sim 50 \div 500$ см, достигая полной длины плазменного столба.

При амплитудной модуляции ВЧ сигнала, подводимого к антенне, в плазме возбуждаются НЧ электромагнитные поля на частоте модуляции. Измерения позволяют однозначно идентифицировать НЧ поля как косые волны свистового диапазона, продольная фазовая скорость которых $v_{\parallel} \sim 10^8 \div 10^9$ см/с значительно превышает поперечную фазовую скорость $v_{\perp} \sim 10^7 \div 10^8$ см/с (рис.2а). Наблюдается возбуждение волн конической рефракции (англ. Gendrin mode [13]), волновой вектор которых практически перпендикулярен к внешнему магнитному полю, а групповая скорость направлена вдоль поля. Преимущественное возбуждение волн данного типа обусловлено геометрией "бестелесной" антенны, которая сильно вытянута вдоль внешнего магнитного поля (что соответствует низким продольным волновым числам k_{\parallel}), но имеет малый поперечный размер (что соответствует высоким поперечным волновым числам k_{\perp}). Поперечная фазовая скорость НЧ волн пропорциональна их частоте (рис.2б) в соответствии с законом дисперсии волн конической рефрак-

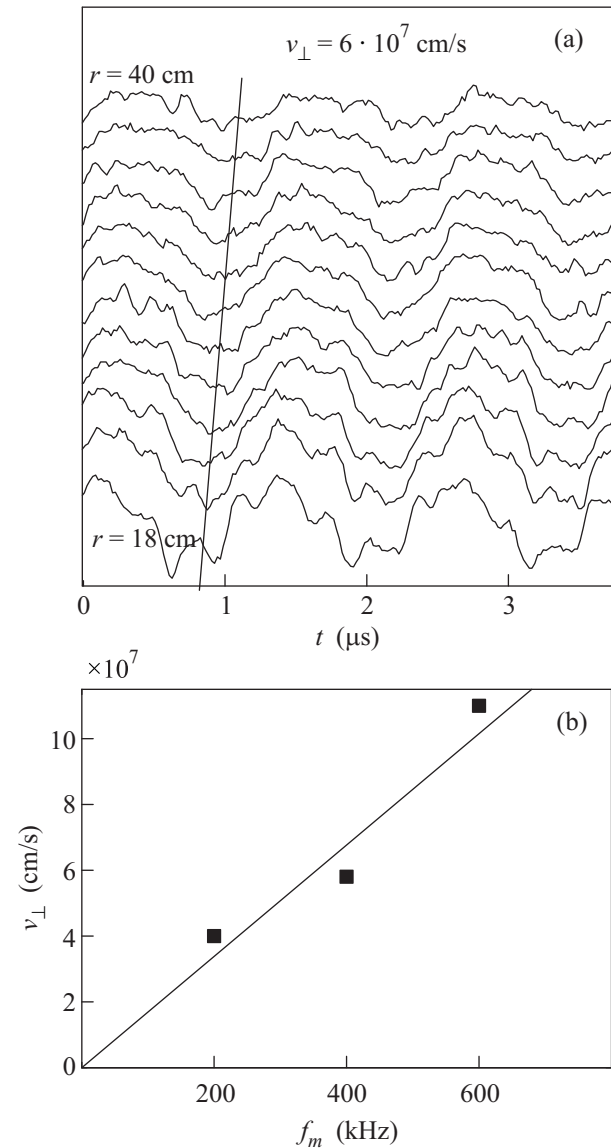


Рис.2. (а) Осциллограммы НЧ волн свистового диапазона, возбуждаемых амплитудно-модулированным ВЧ сигналом в условиях ЭЦР на частоте модуляции $f_m = 400$ кГц и регистрируемых в сечении $z = 64$ см при различных радиальных позициях r измерительного зонда. (б) Поперечная фазовая скорость возбуждаемых НЧ волн в зависимости от частоты $F = f_m$. Концентрация плазмы $n_e \simeq 10^{10}$ см $^{-3}$, величина внешнего магнитного поля $B \simeq 25$ Гс

ции ($v_{\perp} \simeq cf_m/f_{pe}$). Характерные значения амплитуды переменного магнитного поля в НЧ волнах, регистрируемых на периферии плазмы ($r \sim 20 \div 40$ см), приблизительно на 2 порядка ниже, чем в области исходного диамагнитного возмущения вблизи антенны, и составляют $|\Delta B| \sim 10^{-4}$ Гс.

Эксперименты показывают, что поперечные размеры области, занятой НЧ волнами, которые регист-

рируются практически по всему сечению плазменного столба (рис.3а), существенно превосходят диа-

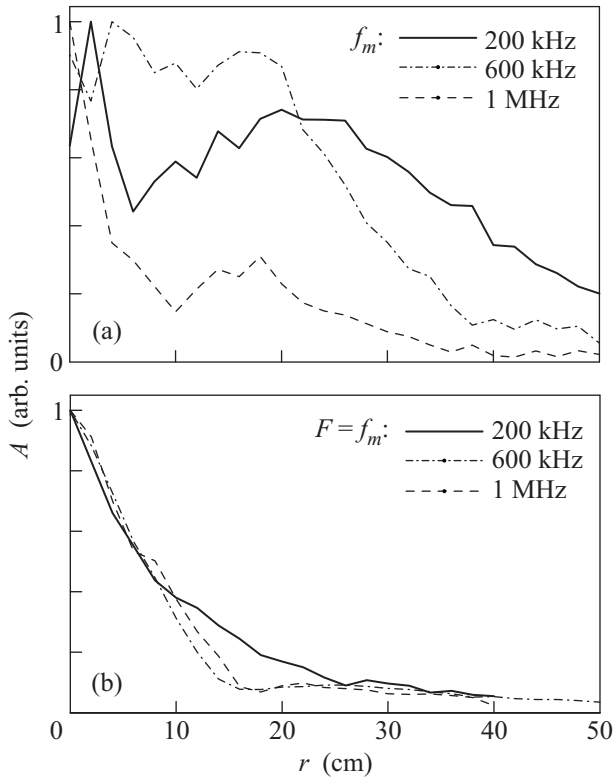


Рис.3. (а) Радиальное распределение амплитуды НЧ волн свистового диапазона, возбуждаемых амплитудно-модулированным ВЧ сигналом в условиях ЭЦР ($f = 66.5$ МГц $\approx f_{ce}$, $P \approx 300$ Вт) при различных частотах модуляции f_m и регистрируемых на расстоянии $z = 48$ см от антенны. (б) Радиальное распределение амплитуды пробных НЧ волн, возбуждаемых при непосредственной подаче НЧ сигнала на рамочную антенну; измерения выполнены на тех же частотах $F = f_m$ в том же сечении z

метр силовой трубки, содержащей ускоренные электроны (< 10 см). Кроме того, ускорение электронов амплитудно-модулированным ВЧ полем в условиях ЭЦР позволяет возбудить НЧ волны в большей области плазмы, чем при их излучении с помощью антенны, к которой подводится НЧ сигнал. На рис.3б приводится радиальное распределение амплитуды пробных НЧ волн, возбуждаемых при непосредственной подаче НЧ сигнала на рамочную антенну. Видно, что в этом случае НЧ волны локализованы вблизи оси плазменного столба на поперечном масштабе $r < 20$ см и не достигают периферии плазмы, как при параметрическом возбуждении амплитудно-модулированным ВЧ полем.

Амплитуда НЧ волн, возбуждаемых при ускорении электронов амплитудно-модулированным ВЧ сигналом, резонансным образом зависит от отношения несущей частоты f к электронной циклотронной частоте (рис.4). Ширина резонанса увеличива-

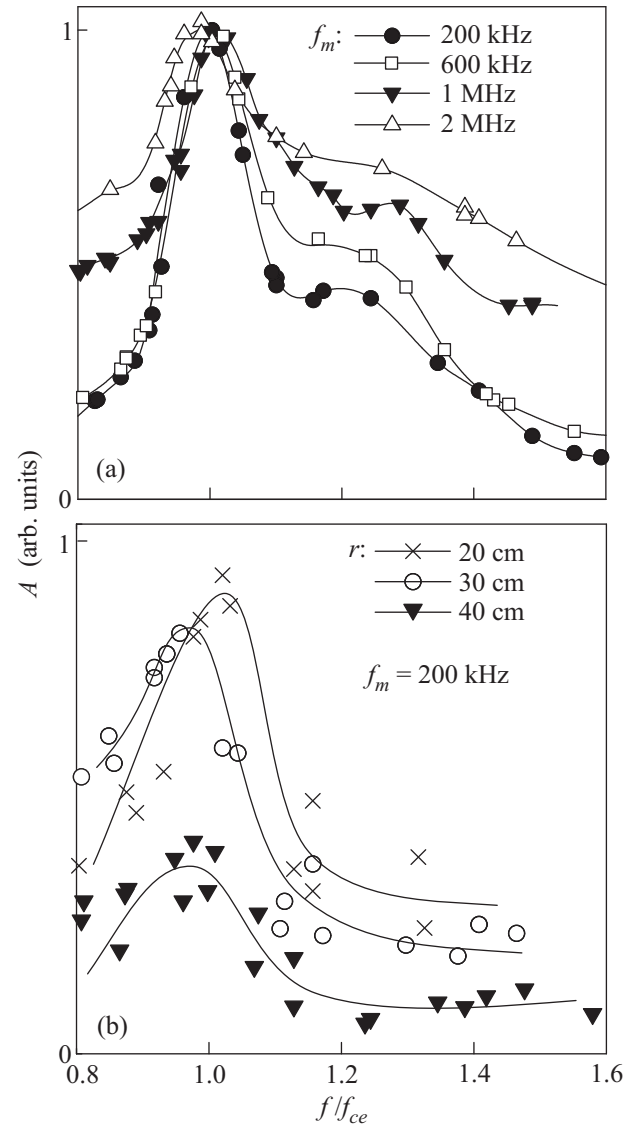


Рис.4. (а) Амплитуда НЧ волн свистового диапазона на частотах $F = f_m$, возбуждаемых амплитудно-модулированным ВЧ сигналом ($f = 66.5$ МГц, $P = 300$ Вт), в зависимости от отношения f/f_{ce} ; измерения выполнены на расстоянии $z = 64$ см от антенны вблизи оси плазменного столба $r = 0$ см. (б) Амплитуда НЧ волн свистового диапазона на частоте $F = f_m = 200$ кГц, возбуждаемых амплитудно-модулированным ВЧ сигналом, в зависимости от отношения f/f_{ce} в сечении $z = 64$ см при различных радиальных позициях r измерительного зонда

ется с повышением частоты модуляции (рис.4а), что обусловлено увеличением полной ширины частотного

спектра ВЧ поля, ускоряющего электроны. Так как амплитуда НЧ волн максимальна в условиях ЭЦР, предлагаемый резонансный механизм генерации, вероятно, эффективнее других параметрических механизмов, использующих, например, пондеромоторную нелинейность плазмы [9].

Кратко обсудим результаты экспериментов. Очевидно, что при максимальной ВЧ мощности ($P \simeq \simeq 300$ Вт), подводимой к антенне, возможны сильные возмущения концентрации электронов n_e , обусловленные развитием различных нелинейных процессов, поскольку напряженность электрических ВЧ полей в ближней зоне достигает $E \sim 10$ В/см, а плотность энергии ВЧ поля превышает плотность энергии теплового движения частиц плазмы. В то же время, характерное время перераспределения концентрации плазмы со звуковой скоростью на масштабах ближней зоны антенны составляет $L/v_s > 20$ мкс, превышая, в частности, период амплитудной модуляции ВЧ поля в экспериментах по параметрической генерации НЧ волн. Отсутствие заметных возмущений концентрации плазмы на указанных временах подтверждается прецизионными измерениями, выполненными зондом с СВЧ резонатором по методике, описанной в [12]. В результате регистрируемый в возмущенной области плазмы диамагнитный эффект связан исключительно с изменением средней поперечной энергии $\langle W_{\perp} \rangle$ электронов относительно невозмущенного значения T_e . При типичных параметрах эксперимента ($|\Delta B| \simeq 10^{-2}$ Гс, $n_e \simeq 10^{10}$ см $^{-3}$, $T_e \simeq 1$ эВ) $\langle W_{\perp} \rangle / T_e \simeq 1 + B|\Delta B| / (4\pi n_e T_e) \simeq 2.2$, то есть поперечная энергия электронов увеличивается более чем в два раза.

Отдельного обсуждения заслуживает поперечная структура НЧ волн, возбуждаемых модулированным диамагнитным током и непосредственно рамочной антенной (рис.3). Эксперименты показывают, что при прямой подаче НЧ напряжения на рамочную антенну распределение амплитуды НЧ волн, возбуждаемых в плазме, имеет меньший поперечный масштаб, чем при их параметрической генерации амплитудно-модулированным ВЧ сигналом, подводимым к той же антенне. Поперечные размеры источников НЧ волн в обоих случаях одинаковы, но существенно отличаются продольные масштабы: “бестелесная” антенна, формируемая модулированным диамагнитным током, имеет конфигурацию соленоида, сильно вытянутого вдоль внешнего магнитного поля. При этом пространственный спектр модулированного диамагнитного тока оказывается не таким широким, как у тока в проводе одновитковой рамочной антенны. В результате возбуждаются НЧ волны с более

узким спектром волновых векторов, и распределение амплитуды НЧ излучения оказывается в целом шире, чем при использовании рамочной антенны.

Для интерпретации результатов измерений НЧ полей, возбуждаемых амплитудно-модулированной ВЧ накачкой, важно, что длины волн НЧ излучения в условиях эксперимента сравнимы с размерами плазменного столба, и составляют $50 \div 200$ см. Таким образом, измерения выполняются в ближней зоне и зоне Френеля “бестелесной” антенны, характеризующейся сложной пространственной структурой модулированного тока ускоренных частиц. Указанным обстоятельством объясняется немонокотное изменение амплитуды НЧ полей по радиусу плазмы при $r < 25$ см (рис.3а). Кроме того, из рис.3а видно, что поперечный размер области плазмы, занятой НЧ излучением, увеличивается при понижении частоты модуляции f_m . Этот эффект, по-видимому, связан с изменением продольного масштаба “бестелесной” антенны. Он определяется длиной, на которой модуляция диамагнитного тока исчезает из-за теплового разброса продольных скоростей электронов, и по порядку величины может быть оценен как $z \sim v_{Te} / f_m$. Соответственно, с понижением частоты модуляции f_m увеличивается эффективная длина излучающей области плазмы. Геометрия “бестелесной” антенны становится ближе к цилиндрической, и амплитуда НЧ волн медленнее убывает по радиусу плазменного столба, что и наблюдается в эксперименте.

Используя преобразования подобия, по результатам лабораторных экспериментов оценим уровень квазистационарных и НЧ возмущений магнитного поля $|\Delta B_{\text{space}}|$, которые могут быть получены в активных экспериментах в верхней ионосфере с использованием мощных антенных систем, установленных на борту КА. При мощности передатчика $P \sim \sim 100 \div 1000$ Вт, нагруженного на антенну с характерными размерами $L \sim 10 \div 100$ м, используя значение масштабного множителя $\gamma \sim 100$, величину квазистационарных диамагнитных возмущений в силовой трубке, опирающейся на антенну, можно оценить как $|\Delta B_{\text{space}}| = \gamma^{-1} |\Delta B| \sim 10^{-4} \div 10^{-3}$ Гс ($10 \div 100$ нТл), что сравнимо с возмущениями магнитного поля при инжекции сильноточных ($I \sim 0.1$ А) пучков энергичных ($W \sim 10$ кэВ) электронов с борта КА [14]. Амплитуда переменного магнитного поля в ОНЧ свистовых волнах с частотами $f_{\text{space}} = \gamma^{-1} f_m \sim 1 \div 10$ кГц, возбуждаемых при подаче на бортовую антенну КА мощного амплитудно-модулированного сигнала, может достигать $|\Delta B_{\text{space}}| \sim 10^{-6} \div 10^{-5}$ Гс ($0.1 \div 1$ нТл).

Таким образом, результаты первых модельных экспериментов показывают, что эффект циклотрон-

ного ускорения электронов в ближней зоне антенн космического базирования может быть использован в целях генерации квазистационарных и НЧ возмущений ионосферной плазмы. Предложена схема параметрической генерации НЧ волн, основанная на ускорении электронов плазмы, окружающей КА, амплитудно-модулированным ВЧ сигналом в условиях ЭЦР. НЧ волны, возбуждаемые при модуляции потока ускоренных электронов в силовой трубке, опирающейся на антенну, занимают существенно большую область плазмы, чем в случае их прямого возбуждения с помощью той же антенны. Несмотря на относительную малость диамагнитных возмущений ($|\Delta B|/B < 10^{-3}$), повышение эффективности генерации НЧ волн достигается за счет увеличения геометрических размеров источника – “бестелесной” антенны, формируемой модулированными диамагнитными токами. К достоинствам предлагаемой схемы генерации НЧ волн относится возможность широкополосной перестройки по низкой частоте. Отметим, что протяженная “бестелесная” антенна является антенной магнитного типа, поскольку формируется замкнутыми электронными токами, возбуждение которых не связано с модуляцией плотности плазмы. В результате реализуются предпочтительные условия для возбуждения электромагнитных НЧ волн, например свистовых или альфвеновских.

Работа выполнена при поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (гранты

09-02-97058-р-поволжье-а, # 09-02-91052-НЦНИ-а и 10-02-01417-а).

1. P. M. E. Decreau, P. Fergeau, V. Krasnoselskikh et al., *Ann. Geophys.* **19**, 1241 (2001).
2. H. G. James, *J. Geophys. Res.* **88**, 4027 (1983).
3. С. А. Пулинец, В. В. Селегей, *Космические исследования* **23**, 113 (1985).
4. F. K. Shuiskaya, Yu. I. Galperin, A. A. Serov et al., *Planet. Sp. Sci.* **38**, 173 (1990).
5. C. Y. Huang, W. J. Burke, D. A. Hardy et al., *J. Geophys. Res.* **106**, 1835 (2001).
6. S. F. Fung, R. F. Benson, J. L. Green et al., *Adv. Space Res.* **30**, 2259 (2002).
7. P. Kulkarni, U. S. Inan, and T. F. Bell, *J. Geophys. Res.* **113**, A09203 (2008).
8. A. G. Demekhov, V. Y. Traktengerts, M. M. Mogilevsky, and L. M. Zelenyi, *Adv. Sp. Res.* **32**, 355 (2003).
9. М. Е. Гушин, С. В. Коробков, А. В. Костров, А. В. Стриковский, *Письма в ЖЭТФ* **88**, 834 (2008).
10. Г. Альвен, К.-Г. Фельтхаммар, *Космическая электродинамика*, М.: Мир, 1967.
11. R. L. Stenzel, *Rev. Sci. Instrum.* **47**, 603 (1976).
12. Д. В. Янин, А. В. Костров, А. И. Смирнов, А. В. Стриковский, *ЖТФ* **78**, 133 (2008).
13. R. A. Helliwell, *Geophys. Res. Lett.* **22**, 2095 (1995).
14. В. Н. Ораевский, Я. П. Соболев, Л. Н. Жузгов и др., *Физика плазмы* **27**, 343 (2001).